



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Hydrochemical tracing and salinity origin of water resources based on combined diagrams in the Sabzevar plain

Mahboubeh Tafazzoli¹, Rahim Bagheri^{2*}, Mahmoud Arjmand Sharif³, Mohsen shojaei⁴

1, 2. Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

3, 4. Regional Water Company of Khorasan Razavi, Khorasan Razavi, Iran.

Article info

Article history

Received: 30 June 2025

Accepted: 30 August 2025

Keywords:

Hydrogeochemistry, Salinity, Groundwater, Flow direction, Sabzevar Plain.



Abstract

The Sabzevar aquifer is one of the important groundwater resources in arid regions of the Khorasan Razavi Province. The different usages from this scarce resource, leads to a quantitative and qualitative crisis. The water level from 50 piezometric and physico-chemical properties of 25 groundwater samples were used to determine the hydrogeological setting and salinity origin of the aquifer. The iso-potential map shows that the groundwater flow directions are mainly from eastern to the western part of the area, which is closely aligned with surface flow direction. In general, the aquifer recharged mainly from the limestone heights of the northern parts of the area. The adjacent Ataeiyeh Plain in the eastern part is also an underground inflow to the aquifer. An ephemeral saline river also flows from the east to the west part of the area. Electrical conductivity varies between 627 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in the recharge areas in the north of the aquifer to 11,600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in the middle part of the aquifer. Groundwater samples are classified based on the electrical conductivity into three groups: freshwater with an electrical conductivity of less than 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and the sodium bicarbonate type in the north of the aquifer, brackish waters with $1000 < \text{EC} < 4000$ and the sodium chloride type in the south of the aquifer, and saline waters with $\text{EC} > 4000$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ and the sodium chloride type in the middle part of the aquifer. The water samples are saturated with calcite and dolomite and under-saturated with gypsum and halite. The salinity of the groundwater in the region is dependent on dissolution of evaporative formations in the region. Therefore, the infiltration of fresh water from the northern parts and some extent from the southern part, along with the infiltration of saline water from the eastern parts and the adjacent aquifer, are the main factors controlling the quality of the groundwater of the plain, along with ion exchange and mixing processes.

Introduction

Water resources are affected by human activities and climate change and are very important in natural and human ecosystems, especially in arid regions (Muratoglu et al., 2022; Xiao et al., 2018). Excessive extraction and human activities threaten the quality of these resources (Liu et al., 2025). Hydrochemical and statistical methods are used to identify the processes affecting groundwater quality as first step toward groundwater management (Gibbs, 1970; Piper, 1944; Kumar et al., 2024). Over-extraction of groundwater resources and saltwater intrusion are important factors in changing the quality of groundwater resources. Other factors include regional geology, intrusion of polluted water, and agricultural

runoff. Hydrochemical methods, compositional and isotopic diagrams are used to study the quality of aquifers. Hydrochemical investigation is essential for the assessment and sustainable management of water resources, and changes in groundwater quality are influenced by natural and anthropogenic factors (Fetter et al., 2018). The Sabzevar Plain is located in the arid and semi-arid region of Khorasan Razavi Province in northeastern Iran. In this paper, using hydrogeochemical and hydrogeological results, the hydrogeological setting, salinity origin, water-rock interaction and geochemical processes that controlling the groundwater quality, are discussed.

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.108001>*Corresponding author: Rahim Bagheri; E-mail: rahim.bagheri86@gmail.com

How to cite this article: Tafazzoli, M., Bagheri, R., Arjmand Sharif, M., shojaei, M., 2025. Hydrochemical tracing and salinity origin of water resources based on the combined diagrams in Sabzevar plain. Kharazmi Journal of Earth Sciences 11(1), 175- 200. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.108001>



BY NC

Materials and Methods

In this study, 25 samples were collected to measure the physico-chemical parameters of the groundwater resources. The pH and EC values were measured in the field and hydrochemical analyses were performed in the laboratory. Also, various software and programs have been used to investigate the hydrochemical and hydrogeological settings of the area.

Results and Discussion

Isopotential map

According to the isopotential map, the general groundwater flow direction is from eastern to the western part of the area, which is aligned with the surface water flow. In general, the aquifer recharged mainly from the limestone heights of the northern parts of the area. The adjacent Ataeiyeh Plain in the eastern part is also an underground recharge source of the aquifer. An ephemeral saline river also flows from the east to the west part of the area.

Electrical conductivity map

The EC values vary between 627 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in the recharge area in the north of the aquifer to 11,600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in the middle part of the aquifer. The increasing groundwater salinity can be due to the geological setting and excessive extraction of groundwater resources, saltwater intrusion and mixing processes.

Water type and origin of salinity

In order to investigate the water type of the resources, the Piper diagram and the Schueller diagram were used. According to the Piper diagram, groundwater resources are divided into three groups: freshwater with an electrical conductivity of less than 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and the sodium bicarbonate type in the north of the aquifer, brackish waters with an $1000 < \text{EC} < 4000$ and the sodium chloride type in the south of the aquifer, and saline waters with $\text{EC} > 4000$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ and the sodium chloride type in the middle part of the aquifer. The salinity of the groundwater in the region is dependent on dissolution of evaporative formations in the region. Therefore, the infiltration of fresh water from the northern parts and

some extent from the southern part, along with the infiltration of saline water from the eastern parts and the adjacent aquifer, are the main factors controlling the quality of the groundwater of the plain, along with ion exchange and mixing processes.

Conclusions

In general, the groundwater flow direction is from east to the west and salty playa. Freshwater recharges from the northern parts and to some extent from the southern part, along with the saline groundwater intrusion from the eastern parts, are the main factors controlling the quality of the Sabzevar plain, along with ion exchange and mixing processes.

References

- Fetter, C. W., Boving, T., Kremer, D. 2018. Contaminant Hydrogeology (3rd ed). Waveland Press.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. Science 170 (3962), pp.1088-1090.
- Kumar, A. and Singh, A., 2024. Pollution source characterization and evaluation of groundwater quality utilizing an integrated approach of Water Quality Index, GIS and multivariate statistical analysis. Water Supply 24 (10), 3517-3539.
- Liu, H., Hu, X., Zhu, H., Xing, L., Han, Z., Hu, K., Wang, X., Huang, L., 2025. Analysis of the hydrogeochemical characteristics of groundwater and identification of pollution sources in facility agriculture areas using self-organizing neural networks. Environmental Earth Sciences 84 (6), 161.
- Muratoglu, A., Iraz, E., Ercin, E., 2022. Water resources management of large hydrological basins in semi-arid regions: Spatial and temporal variability of water footprint of the Upper Euphrates River basin. Science of the Total Environment 846,157396.
- Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Eos, Transactions American Geophysical Union 25 (6), 914-928.
- Xiao, Y., Shao, J., Frape, S., Cui, Y., Dang, X., Wang, S., Ji, Y., 2018. Groundwater origin, flow regime and geochemical evolution in arid endorheic watersheds: a case study from the Qaidam Basin, northwestern China. Hydrology and Earth System Sciences 22, 4381-4400.

CRediT authorship contribution statement	
 Mahboubeh Tafazzoli	Conceptualization, methodology, software, investigation, resource writing, original draft
 Rahim Bagheri	Formal analysis, data curation, writing- review and editing, supervision, project administration , funding acquisition
 Mahmoud Arjmand Sharif	Investigation
 Mohsen shojaei	Investigation-data gathering



ردیابی هیدروشیمی و منشأ شوری منابع آب براساس نمودارهای ترکیبی در دشت سبزوار

محبوبه تفضلی^۱، رحیم باقری^{۲*}، محمود ارجمند شریف^۳، محسن شجاعی^۴

۱، ۲. دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۳، ۴. شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، خراسان رضوی، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸	آبخوان دشت سبزوار یکی از منابع آب زیرزمینی مهم در شمال شرق ایران و در منطقه خشک و کم باران قرار دارد. با توجه به اینکه بخش عمده مصارف شرب و کشاورزی از آب‌های زیرزمینی این دشت تأمین می‌کند، با بحران کمی و کیفی روبرو شده است. در این مطالعه، از اطلاعات تراز سطح آب زیرزمینی ۵۰ چاه پیزومتری در سال ۱۴۰۳ و خصوصیات فیزیکو-شیمیایی ۲۵ نمونه آب زیرزمینی برای تعیین رژیم هیدروژئولوژیکی و شناسایی منشأ شوری و فرایندهای ژئوشیمیایی حاکم بر منطقه استفاده شده است. به‌طور کلی جهت جریان آب زیرزمینی از سمت شرق به غرب و هم‌جهت با جریان‌ات سطحی می‌باشد. بیش‌ترین میزان تغذیه این آبخوان از ارتفاعات آهکی بخش‌های شمالی دشت صورت می‌گیرد و بخشی از آن نیز توسط قسمت‌های شرقی و جنوب‌شرقی دشت تأمین می‌شود. دشت عطاءیه در شرق آبخوان نیز تغذیه‌کننده زیرزمینی این آبخوان است. رودخانه کال شور به‌صورت فصلی نیز از سمت شرق به غرب در جریان می‌باشد. مقدار هدایت الکتریکی از ۶۲۷ در مناطق تغذیه در شمال آبخوان تا ۱۱۶۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در قسمت میانی آبخوان متغیر می‌باشد. بر اساس هدایت الکتریکی نمونه‌ها به سه گروه آب‌های شیرین با هدایت الکتریکی کمتر از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و تیپ بیکرناته سدیک در شمال آبخوان، آب‌های لب شور با $EC < 4000$ و تیپ کلروره سدیک در جنوب آبخوان و آب‌های شور با $EC > 4000$ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و تیپ کلروره سدیک در قسمت میانی آبخوان تقسیم می‌شوند. تمامی نمونه‌ها نسبت به کلسیت و دولومیت اشباع و نسبت به ژپس و هالیت تحت اشباع هستند. جهت بررسی منشأ شوری در آبخوان از نمودارها و شاخص‌های یونی مختلف استفاده شد و نتایج نشان داد انحلال سازندهای تبخیری موجود در منطقه از دلایل تغییر کیفیت و افزایش شوری آب زیرزمینی منطقه می‌باشند. بنابراین نفوذ آب شیرین از بخش‌های شمالی و تا حدودی از بخش جنوبی به همراه نفوذ آب‌های شور از بخش‌های شرقی و آبخوان مجاور عامل اصلی کنترل کیفیت آب زیرزمینی دشت هستند که در طی آن تبادل یونی و اختلاط نیز صورت می‌گیرد. از لحاظ کیفیت منابع آب جهت مصارف کشاورزی، اکثر چاه‌ها به علت افزایش شوری، برای کشاورزی نامناسب می‌باشند.



مقدمه

عوامل مختلفی مانند فعالیت‌های انسانی (کشاورزی، صنعتی) و همچنین تغییرات آب و هوا منابع آبی را تحت تأثیر خود قرار داده‌اند. این منابع از فاکتورهای اصلی و مهم در محیط زیست طبیعی و اجتماعی بخصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند (Muratoglu et al., 2022; Xiao et al., 2018). از جمله منابع

ارزشمند و مهم آبی می‌توان به آب‌های سطحی و زیرزمینی اشاره کرد که از اجزای مهم چرخه هیدرولوژیکی می‌باشند (Brunner et al., 2017; Margarita et al., 2022; Xu et al., 2009). آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع برای آشامیدن، آبیاری و مصارف صنعتی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد (Xing et al., 2013). با وجود اهمیت بالای منابع آب زیرزمینی عواملی از جمله افزایش برداشت بی‌رویه، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی منجر

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.108001>

*نویسنده مسئول: رحیم باقری rahim.bagheri86@gmail.com

استناد به این مقاله: تفضلی، م.، باقری، ر.، ارجمند شریف، م.، شجاعی، م. (۱۴۰۴). ردیابی هیدروشیمی و منشأ شوری منابع آب براساس نمودارهای ترکیبی در دشت سبزوار. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۱، شماره ۱، صفحه ۱۷۵ تا ۲۰۰. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.108001>



به تخریب کیفیت این منابع شده است (Liu et al., 2025). بنابراین با توجه به این موضوع، حفظ و توسعه پایدار این منابع، از اصلی ترین برنامه های مدیریتی در منابع آبی است (Mjemah et al., 2009). کیفیت آب زیرزمینی در یک منطقه تابعی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی است که بیشتر تحت تأثیر سازندهای زمین شناسی و فعالیت های انسانی قرار می گیرد، در نتیجه، بررسی و مطالعه این منابع به منظور حفظ کیفیت آن ها ضروری می باشد. هوازگی سنگ ها، تبادل یونی، اختلاط و تأثیر فعالیت های انسانی از جمله عوامل مؤثر کنترل کننده کیفیت آب های زیرزمینی هستند (Gibbs, 1970; Piper, 1944; Kumar et al., 2024). همانطور که می دانیم عوامل مختلفی در تغییر کیفیت منابع آب زیرزمینی نقش دارند که از مهم ترین آن ها می توان به برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و یا پیشروی آب شور به داخل آبخوان اشاره کرد (Zhao et al., 2021; Bagheri et al., 2017; Alfarrach et al., 2018). از دیگر عوامل مهم تغییر کیفیت آب های زیرزمینی می توان به زمین شناسی منطقه (انحلال کانی های تبخیری از سازندهای زمین شناسی)، پیشروی آب شور یا آب های آلوده از منابع مختلف، آب برگشتی کشاورزی و غیره اشاره کرد که به منظور بررسی اثر این عوامل از روش های مختلفی همچون، روش های هیدروشیمیایی (استفاده از نسبت های یونی)، دیاگرام های ترکیبی (شولر، ویلکاکس) و روش های ایزوتوپی می توان استفاده کرد. استفاده از روش های مختلف به منظور بررسی هیدروشیمیایی و ارزیابی کیفیت آب، و در نهایت مدیریت پایدار منابع آب ضروری است (Fetter et al., 2018). امروزه بررسی و مطالعه عملکردهای زمین شناسی، هیدروژئولوژی، تحقیقات ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی به منظور مطالعه کیفی آب های زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا بالا رفتن مصارف مختلف آب (صنعت، کشاورزی، شرب) خطر کاهش کمیت و کیفیت منابع آبی را در آینده به همراه دارد (Doveri et al., 2015; Vespasiano et al., 2020).

مطالعات اخیر در حوزه هیدروژئوشیمی آب های زیرزمینی نقش اساسی این منابع را در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعتی بیش از پیش آشکار کرده است بر اساس پژوهش های جدید تغییرات کیفی آب های زیرزمینی تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی از جمله هوازگی سنگ ها نفوذ آلاینده ها و تغییرات اقلیمی قرار دارد. دشتی برمکی و همکاران (Dashti Barmaki et al., 2024)، با استفاده از روش الگوریتم زمین آماری بر روی پایش کیفیت آب زیرزمینی آبخوان رفسنجان، مناطق آلوده دشت را شناسایی کردند.

زیون و همکاران (Ziwen et al., 2024)، فاکتورهای مؤثر بر هیدروشیمی و ایزوتوپی آب های سطحی و زیرزمینی و ارتباط آن ها را بررسی کردند و دریافتند که اختلاف شاخص اشباع کانی ها در طی واکنش آب های سطحی و زیرزمینی در دوره های مختلف، قابل تشخیص است. افزایش زمان ماندگاری، باعث افزایش انحلال مواد معدنی و در نتیجه باعث بالا رفتن شاخص اشباع می شود. هی و همکاران (He et al., 2022) بر روی بررسی کیفیت آب های زیرزمینی با استفاده از روش های هیدروشیمیایی و GIS مطالعه کردند و در این مطالعه به بررسی عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر کیفیت آب های زیرزمینی پرداخته و از روش های آماری چند متغیره و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تحلیل داده ها استفاده کردند و در این مطالعه علاوه بر تعیین تیپ آب، به این نتیجه رسیدند که هوازگی و واکنش آب و سنگ، علت اصلی تغییرات شیمی آب می باشد. همچنین، مشاهده کردند که شهرنشینی، فعالیت های کشاورزی و صنعتی اثر منفی بر روی کیفیت آب زیرزمینی دارند. میلوگو و همکاران (Millogo et al., 2024) ارزیابی مکانی و هیدروشیمی کیفی آب های زیرزمینی در جنوب Faso در غرب آفریقا را بررسی کردند و دریافتند که فرآیندهای ژئوشیمیایی مانند هوازگی سیلیکات، انحلال و بارش مواد معدنی، تبادل یونی و تبخیر و تعرق عوامل اصلی مؤثر بر جذب املاح در آب های زیرزمینی بودند. لی و همکاران (Liu et al., 2025) با مطالعه تأثیر تغییرات اقلیمی بر هیدروشیمی آب های زیرزمینی به این نتیجه رسیدند که کاهش

بارندگی و افزایش تبخیر به دلیل تغییرات اقلیمی منجر به افزایش شوری و تغییرات هیدرو شیمی در آب‌های زیرزمینی شده است. در مطالعه هی و همکاران (He et al., 2020) ارزیابی آلودگی نترات در آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل سازی هیدروشیمیایی نتایج نشان داد که فعالیت‌های کشاورزی و فاضلاب‌های شهری منجر به افزایش غلظت نترات در آب زیرزمینی شدند. باقری و همکاران (Bagheri et al., 2019) بر روی خطرات برداشت بیش از حد و شوری زایی در آبخوان دشت بسطام مطالعه کردند و دریافتند که استخراج بیش از حد آب زیرزمینی با وجود مقدار کم بارش و تغییر الگوی بارندگی، باعث افت سطح آب زیرزمینی و نفوذ آب شور از شرق و غرب آبخوان به داخل آبخوان بسطام شده است. سوده‌گی و باقری (Sudegi and Bagheri., 2024) با مطالعه برداشت مطمئن در مناطق خشک به این نتیجه رسیدند که ادامه روند فعلی برداشت از آبخوان، سبب کاهش ذخیره سالانه از آن و همچنین، افت ممتد سطح آب زیرزمینی آبخوان سالهای آتی را در پی خواهد داشت. شاکری و همکاران (Shakeri et al., 2025)، با بررسی فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی در مجاورت محل دفن زباله‌های شهری در لندفیل قزوین دریافتند که کیفیت آب زیرزمینی اطراف لندفیل محمداً باد قزوین تحت تأثیر فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی طبیعی (مانند انحلال معدنی، تبادل کاتیونی و تبخیر) و فعالیت‌های انسانی (نفوذ شیرابه، کشاورزی و دامداری) قرار دارد و غلظت یون‌های اصلی (کلرید، سولفات، سدیم، TDS، EC و فلزات سنگین (آرسنیک و سرب) در نزدیکی لندفیل بالاتر از حد مجاز است.

دشت سبزوار در منطقه خشک و نیمه‌خشک در استان خراسان رضوی در شمال شرق ایران واقع شده است. این آبخوان نقش مهمی در مصارف شرب، صنعتی و کشاورزی دارد. افت سطح آب زیرزمینی در منطقه با نرخ متوسط ۰/۵ متر در سال و افزایش عمق سطح آب، باعث تغییر الگوی جریان آب زیرزمینی و در نتیجه باعث هجوم آب شور از اطراف و افزایش شوری و در نهایت کاهش کیفیت و آب مطلوب در دسترس برای مصارف مختلف می‌گردد. بنابراین مطالعه و

بررسی کیفی منابع آب این منطقه، اولین قدم در جهت مدیریت آبخوان در راستای حفظ و نگهداری این آبخوان در منطقه خشک و کم باران می‌باشد. در این مقاله، با استفاده از نتایج و اطلاعات کمی و کیفی، به بررسی خصوصیات هیدروژئولوژی، جهت جریان آب زیرزمینی، تغییرات هدایت الکتریکی، منشأ شوری و فرآیندهای ژئوشیمیایی کنترل‌کننده کیفیت آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی دشت سبزوار پرداخته شده است.

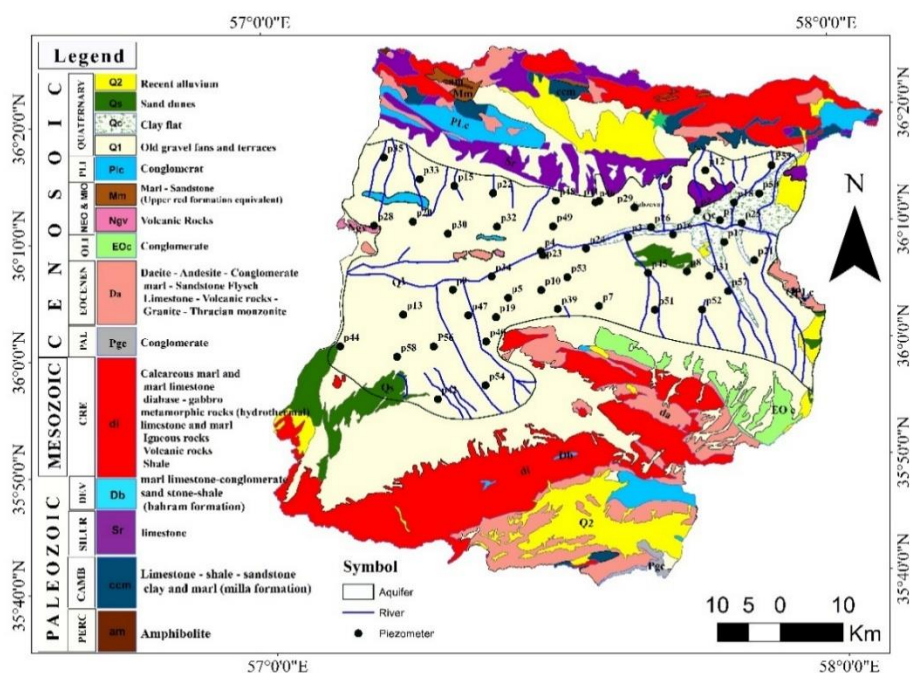
منطقه مورد مطالعه

دشت سبزوار یکی از زیرحوضه‌های، حوضه آبریز کویر مرکزی می‌باشد که در بخش شرقی آن و در استان خراسان رضوی واقع شده است. آبخوان آبرفتی سبزوار در شمال شرق ایران و در این حوضه قرار دارد. این آبخوان با مساحت ۲۱۵۳ کیلومترمربع در بخش میانی حوضه و حد فاصل ارتفاعات شمالی و جنوبی واقع شده است. شهر سبزوار نیز در این محدوده واقع شده است. از لحاظ اقلیمی دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک است که میزان بارش در آن بطور متوسط ۱۸۴ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۷/۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. به لحاظ هیدروژئولوژیکی از سمت شرق در مجاورت با دشت عطائیه است که دارای آب زیرزمینی شور با هدایت الکتریکی بالا می‌باشد که آبخوان سبزوار را تغذیه می‌کند و همچنین کال شور بعنوان رودخانه فصلی در این دشت جریان دارد که بعد از عبور از دشتهای نیشابور و عطائیه، از سمت شرق وارد آبخوان سبزوار و همچنین تغذیه آبخوان می‌شود. در این دشت، ۹۷۸ حلقه چاه با برداشت سالانه حدود ۱۵۶ MCM برای مصارف صنعتی و کشاورزی در سراسر آبخوان وجود دارد که بیشتر آن‌ها در شمال و جنوب آبخوان متمرکز شده‌اند. به‌طور کلی در این آبخوان، نرخ افت سالانه در حدود ۰/۵ متر در سال اندازه‌گیری شده است که باعث کسری مخزن در حدود ۳۳ MCM در سال شده است. همچنین ۵۰ پیزومتر در آبخوان به‌منظور پایش تراز سطح آب زیرزمینی حفاری شده است.

زمین‌شناسی منطقه

آبخوان سبزوار از لحاظ ساختاری، بین دو زون مختلف، ارتفاعات شمال منطقه در زون بینالود و ارتفاعات جنوب در زون ایران مرکزی قرار دارد. واحدهای سنگی آذرین اولترامافیک تا مافیک کرتاسه فوقانی در ارتفاعات شمال دشت سبزوار و واحدهای سنگی آندزیت، توف، گرانیت و دیاباز ارتفاعات جنوب منطقه را تشکیل می‌دهند. سنگ‌های آذرین همراه با رسوبات آهکی و رادیولاریتی پلاژیک تحت تأثیر نیروهای تکتونیکی آمیزه‌های رنگی (افیولیت ملانژ) را بوجود آورده‌اند و یکی از کمربندهای افیولیتی عمده شمال شرق ایران را تشکیل می‌دهند و میزبان معادن فعال کرومیت می‌باشند (Moghadam et al., 2015, Shojaat et al., 2003). در دوره ائوسن یکسری گدازه‌های آندزیتی-بازالتی در ارتفاعات شمالی و توده‌های گرانیتی در ارتفاعات جنوبی و همچنین رسوبات فیلیشی و سنگ‌های تخریبی و تبخیری به‌طور وسیعی در جنوب شرق این حوزه توسعه یافته‌اند. در زمان نفوذ نیز مارن‌ها و مارن‌های گچ‌دار و کنگلومرا با درون لایه‌های مارنی در جنوب شرق حوزه به وجود آمده است.

رسوبات کواترنر شامل مخروط افکنه‌ها و تراس‌های آبرفتی قدیمی (Q_1) مخروط افکنه‌ها و تراس‌های جوان آبرفتی (Q_2) و رسوبات عهد حاضر شامل آبرفت‌های رودخانه‌ای، تپه‌های ماسه‌ای (Qs) و کفه‌های رسی (Qc) می‌باشد. مخروط افکنه‌ها و تراس‌های آبرفتی قدیمی (Qt_1) عمدتاً از قطعات نسبتاً درشت دانه گراول در حاشیه ارتفاعات و ذرات ریزدانه سیلت و رس در بخش‌های مرکزی و غربی تشکیل شده‌اند. رخنمون تشکیلات سنگی خصوصاً در بخش شمالی آبخوان آبرفتی دشت سبزوار دلالت بر این دارد که آبخوان آبرفتی این دشت ضخامت یکسانی نداشته و در بخش‌های مختلف تغییر می‌نماید. تپه‌های ماسه‌ای (Qs) که حاصل عملکرد فرآیند فرسایشی باد بر روی تشکیلات قدیمی‌تر هستند، بخش وسیعی از سطح آبخوان آبرفتی دشت سبزوار را به خود اختصاص می‌دهند. در مجاور آبخوان دشت سبزوار، کفه نمکی وجود دارد که می‌تواند باعث تخریب کیفی آبخوان‌های اطراف باشد. شکل ۱، نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت پیزومترها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی و موقعیت پیزومترهای آبخوان سبزوار

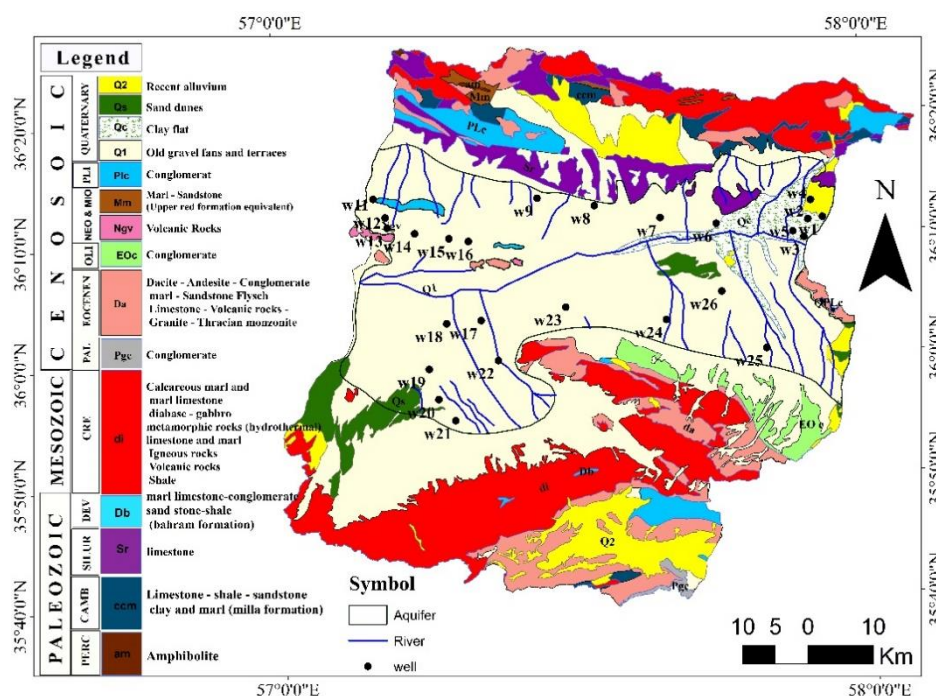
Fig. 1. Geological map and location of piezometers in the Sabzevar aquifer

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، نمونه برداری از ۲۵ حلقه چاه پمپاژ انجام شد (شکل ۲). پارامترهای pH و EC در محل اندازه‌گیری شد. نمونه‌های برداشت شده در بطری‌های ۱ لیتری، بلافاصله برای انجام آنالیزهای هیدروشیمیایی به آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود منتقل و آنالیز شدند. در آزمایشگاه غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم توسط نورسنج شعله‌ای، و همچنین غلظت یون‌های

بیکربنات، کلر، کلسیم و منیزیم توسط تیتراسیون و غلظت یون سولفات با استفاده از اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شد. درصد خطای آنالیز یون‌های اصلی در هر نمونه آب از طریق رابطه زیر محاسبه شد و خطای تمامی نمونه‌ها در محدوده قابل قبول (کمتر از ۵٪) قرار دارد. جدول ۱ نتایج آنالیز هیدروشیمیایی نمونه‌های آنالیز شده را نشان می‌دهد.

$$\%Error = \frac{|\sum Cations - \sum Anions|}{\sum Cations + \sum Anions} * 100 \quad (1)$$



شکل ۲- موقعیت محل‌های نمونه‌برداری در آبخوان سبزوار

Fig. 2. The locations of water sampling points

جدول ۱- خصوصیات فیزیکو-شیمیایی و نتایج آنالیز هیدروژئوشیمیایی

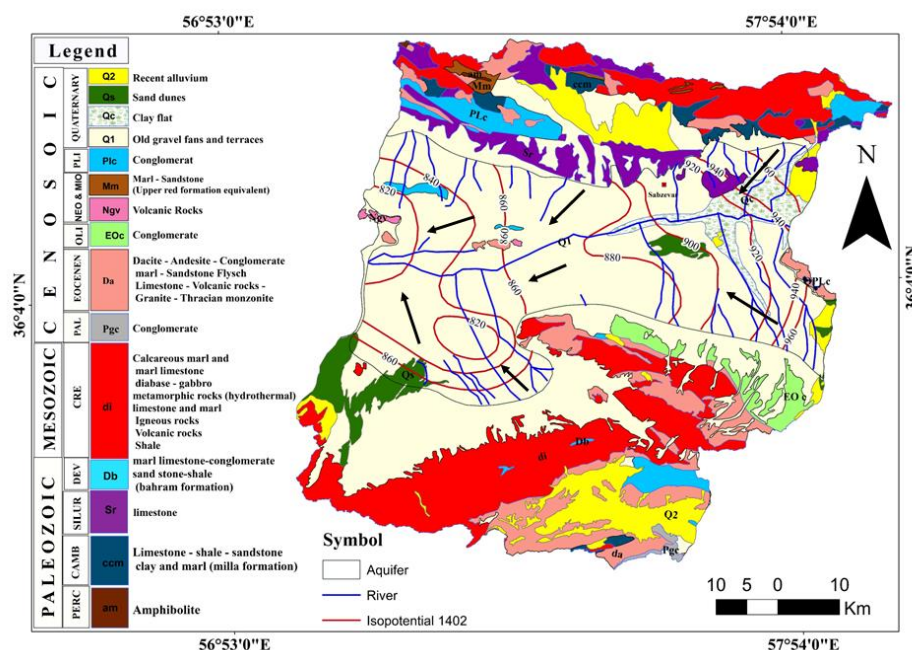
Table 1. Physico-chemical characteristics and the results of hydrogeochemical analysis

Well	Group	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Concentration (epm)							
				K	Na	Mg	Ca	SO ₄	Cl	Na+K	HCO ₃
w7	1	7.9	627	0.16	3.67	0.85	1.95	1.20	3.1	3.83	5.5
w11	1	8.0	703	0.16	3.96	1.12	0.89	2.10	3.6	4.11	3.2
w12	1	8.3	1118	0.17	6.95	1.35	1.27	2.60	5.1	7.12	5.3
w6	2	7.4	1825	0.15	14.75	3.42	4.50	3.50	18.6	14.90	2.4
w25	2	7.9	2280	0.12	21.25	1.38	5.14	13.17	12.6	21.37	2.6
w22	2	7.4	2760	0.11	24.64	1.43	4.53	12.61	21.1	24.75	1.7
w13	2	7.9	3020	0.15	27.47	1.87	1.13	12.70	21.1	27.62	4.3
w20	2	7.5	3170	0.13	28.03	1.98	1.45	10.10	24.7	28.17	2.5
w21	2	7.5	3260	0.13	27.47	1.21	4.08	15.48	25.7	27.60	2.1
w18	2	7.5	3560	0.11	25.77	2.45	5.67	11.61	31.6	25.88	1.9
w17	2	7.7	3800	0.11	30.30	1.75	6.28	11.43	34.4	30.41	1.2
w15	3	7.9	4220	0.12	32.56	2.89	1.43	12.66	36.0	32.68	4.3
w9	3	7.5	4500	0.14	32.56	3.88	4.06	23.21	40.0	32.71	4.0
w14	3	8.0	4580	0.13	34.82	2.79	1.78	23.55	37.5	34.95	3.5
w19	3	7.0	4710	0.12	32.84	2.35	7.73	18.96	44.0	32.96	1.8
w2	3	7.8	5800	0.13	46.69	16.52	8.43	16.61	73.0	46.81	3.5
w8	3	7.6	5940	0.13	53.47	6.75	5.43	26.01	57.0	53.60	4.0
w26	3	7.0	6070	0.17	51.77	4.18	16.73	24.45	62.0	51.94	1.2
w23	3	7.0	6520	0.18	48.38	4.97	17.67	22.78	72.5	48.56	0.8
w1	3	7.5	7660	0.19	52.90	17.40	9.34	15.43	94.3	53.09	3.1
w16	3	7.2	8090	0.18	53.47	19.91	12.71	35.98	91.1	53.65	3.7
w4	3	7.4	8900	0.16	64.21	15.48	11.23	24.78	106.5	64.37	2.1
w3	3	7.3	9320	0.19	71.56	17.76	13.54	64.82	98.5	71.74	2.0
w5	3	7.2	9330	0.15	64.77	9.99	12.87	28.03	102.5	64.93	1.1
w24	3	7.0	11600	0.11	65.34	13.85	45.92	53.57	144.5	65.45	1.5

بحث

به منظور بررسی مناطق تغذیه و تخلیه و جهت کلی جریان آب زیرزمینی آبخوان سبزوار، نقشه تراز سطح آب زیرزمینی در خرداد ماه سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ رسم شده است (شکل ۳). بالاترین سطح آب در شرق آبخوان به میزان ۹۶۰ متر و کمترین سطح آب را در غرب آبخوان به میزان ۸۲۰ متر از سطح دریا اندازه گیری شده است که بیانگر جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از شرق به سمت غرب می باشد که هم جهت با شیب توپوگرافی و جریانات سطحی می باشد. عمق آب زیرزمینی در منطقه بین ۱۰ متر در بخش های مرکزی تا حدود ۱۰۰ متر در حاشیه های شمالی و جنوبی آبخوان متغیر می باشد. تغذیه این آبخوان عمدتاً از ارتفاعات آهکی بخش های شمالی دشت و بصورت تغذیه بخشی از بخش های شرقی و جنوب

شرقی دشت صورت می گیرد. دشت عطائیه در شرق آبخوان می تواند تغذیه کننده زیرزمینی این آبخوان باشد. در جریانات سطحی، کال شور یک رودخانه فصلی است که با عبور از دشت نیشابور و عطائیه از شرق آبخوان وارد دشت سبزوار شده و از سمت غرب به کفه نمکی مجاور تخلیه می شود. این رودخانه بر روی رفتار هیدرولیکی آبخوان تأثیر گذاشته است. با توجه به نقشه همپتانسیل، این رودخانه در بخش ورودی دشت نقش آبگیر و در بخش های مرکزی و خروجی دشت در زمان های سیلابی نقش آبرده را دارد. افزایش برداشت و افت تراز آب زیرزمینی در بخش های مختلف دشت بخصوص در بخش جنوب غربی، باعث تغییر جهت جریان به سمت چاه ها شده است. به طوری که خطوط همپتانسیل در این ناحیه بصورت دوایر بسته در آمده و نقش یک Well field را ایجاد کرده است.



شکل ۳- نقشه هم‌پتانسیل آبخوان سبزوار (۱۴۰۳-۱۴۰۲)

Fig. 3. Iso-potential map of the Sabzevar aquifer (2024-2025)

۳- گروه G3 دارای $EC > 4000$ میکروزیمنس بر سانتی‌متر که در قسمت میانی دشت واقع شده‌اند.

با توجه به نقشه هم‌هدایت الکتریکی، میزان هدایت الکتریکی در آبخوان سبزوار از بخش‌های شمالی و جنوبی به سمت مرکز آبخوان افزایش می‌یابد. بطور کلی میزان شوری آب‌های تغذیه‌شده سازندی از بخش‌های شمالی و جنوبی در حدود ۳۰۰۰ می‌باشد. انتظار می‌رود بصورت عمومی، در جهت جریان آب زیرزمینی، مقدار شوری افزایش یابد، ولی در دشت مورد مطالعه رفتاری برعکس داشته و در خروجی دشت، مقدار هدایت الکتریکی کمتر از بخش‌های مرکزی و ورودی شرقی دشت می‌باشد.

افزایش مقدار شوری در بخش‌های مرکزی دشت می‌تواند به علت جریان رودخانه کال‌شور در بخش مرکزی و همچنین جریان آب زیرزمینی شور از دشت عطائیه از سمت شرق به غرب می‌باشد. بطوریکه در بخش شرقی و ورودی زیرزمینی دشت از سمت

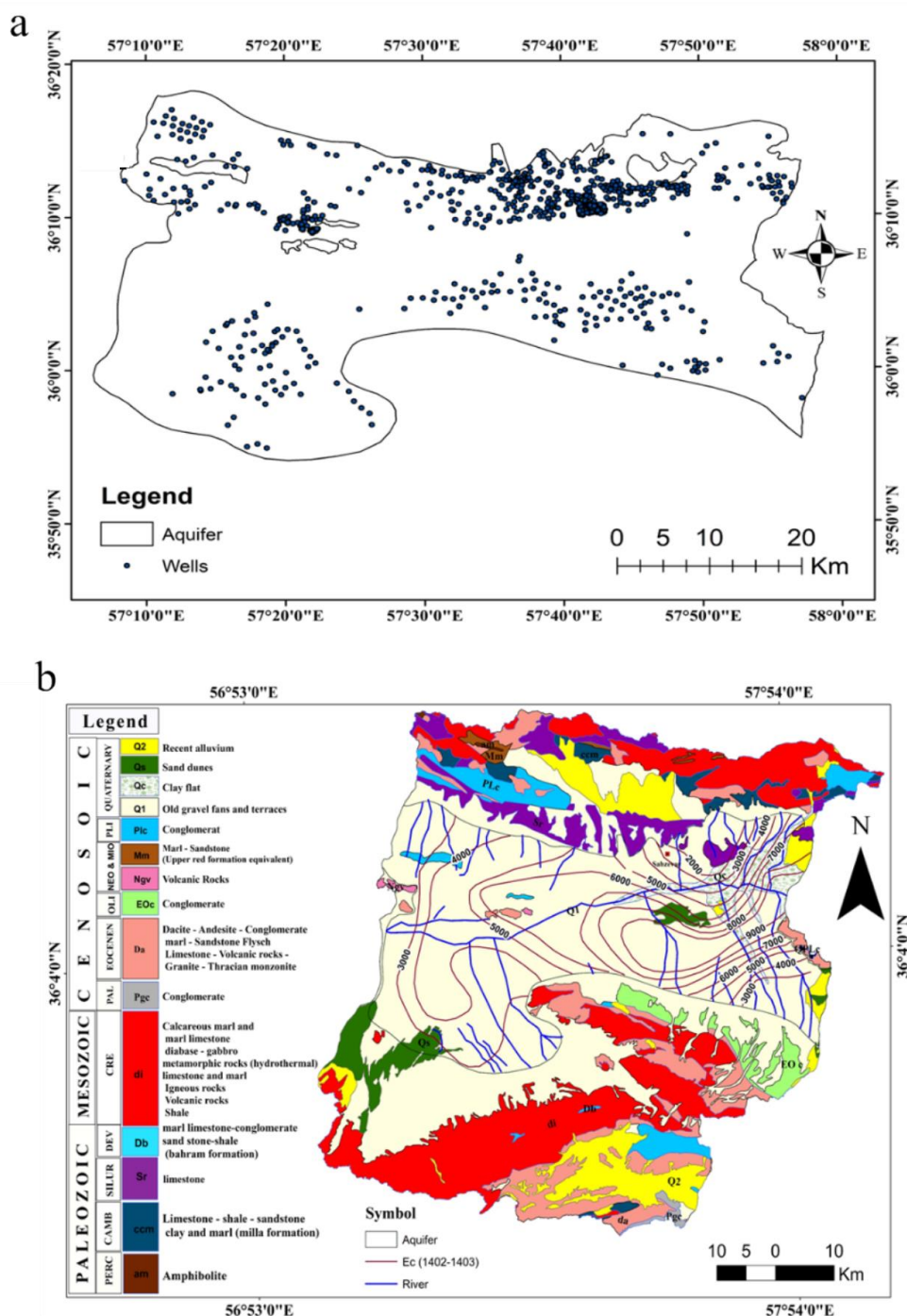
بررسی هیدروژئوشیمیایی منابع آب دشت سبزوار نقشه تغییرات هدایت الکتریکی

با توجه به جدول ۱، گستره تغییرات EC در نمونه‌های برداشت شده بین ۶۲۷ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در منطقه تغذیه در شمال آبخوان تا ۱۱۶۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در قسمت میانی آبخوان متغیر می‌باشد. شکل ۴ موقعیت کل چاه‌های پمپاژ منطقه (۴-ا) و نقشه هدایت الکتریکی (۴-ب) را نشان می‌دهد. منابع آب دشت مورد مطالعه بر اساس میزان هدایت الکتریکی به سه گروه زیر تقسیم‌بندی شده است و موقعیت آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. این تقسیم‌بندی فقط جهت تفکیک و گروه‌بندی چاه‌ها صورت گرفته است:

- ۱- گروه G1 با $EC < 1000$ میکروزیمنس بر سانتی‌متر که در شمال و شمال غرب آبخوان قرار دارند.
- ۲- گروه G2 دارای $1000 < EC < 4000$ میکروزیمنس بر سانتی‌متر که در قسمت جنوبی دشت هستند.

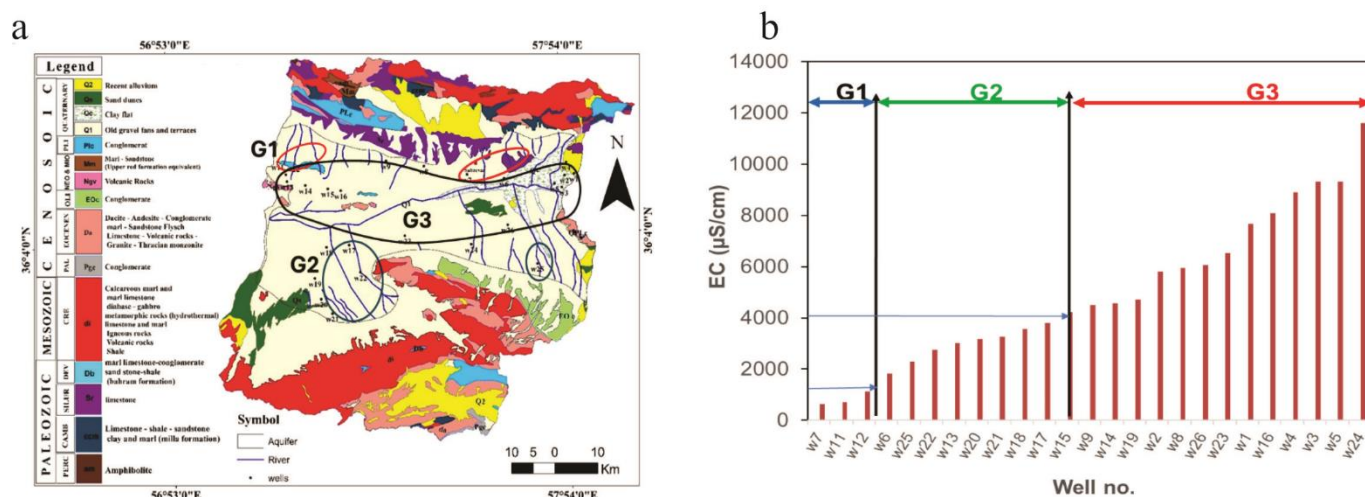
عطائیه میزان شوری زیاد می‌باشد. با توجه به تغذیه آب‌های شیرین‌تر از بخش‌های شمالی و جنوبی دشت، اختلاط در بخش‌های مرکزی دشت صورت گرفته و باعث رقیق شدن و کمتر شدن مقدار شوری در مسیر جریان آب زیرزمینی می‌گردد. به دلیل مقدار تغذیه بیشتر از بخش‌های شمالی نسبت به جنوبی دشت، زون و جبهه آب شور ورودی شرقی به سمت بخش‌های جنوبی دشت کشیده شده و از رودخانه آب شور نیز فاصله گرفته است. با توجه به جهت جریان آب زیرزمینی و همچنین ورودی‌ها

در آبخوان سبزوار، افزایش EC به سمت مرکز دشت قابل توجه است. بطور کلی، احتمالاً افزایش شوری آب زیرزمینی در آبخوان سبزوار می‌تواند به علت موقعیت زمین‌شناسی و برداشت بیش از حد از منابع زیرزمینی، نفوذ آب شور، پدیده انحلال نمک و تبادل یونی باشد که در ادامه این موارد بررسی شده است. تمرکز بالای چاه‌های برداشتی در شمال و جنوب آبخوان می‌تواند دلیل نفوذ آب شور و افزایش هدایت الکتریکی در شرق آبخوان باشد.



شکل ۴- موقعیت چاههای بهره‌برداری آب زیرزمینی (a) و نقشه هدایت الکتریکی (b) در آبخوان سبزوار (۱۴۰۳-۱۴۰۲)

Fig. 4. The water well location (a) and the EC map (b) of the Sabzevar aquifer (2024-2025)

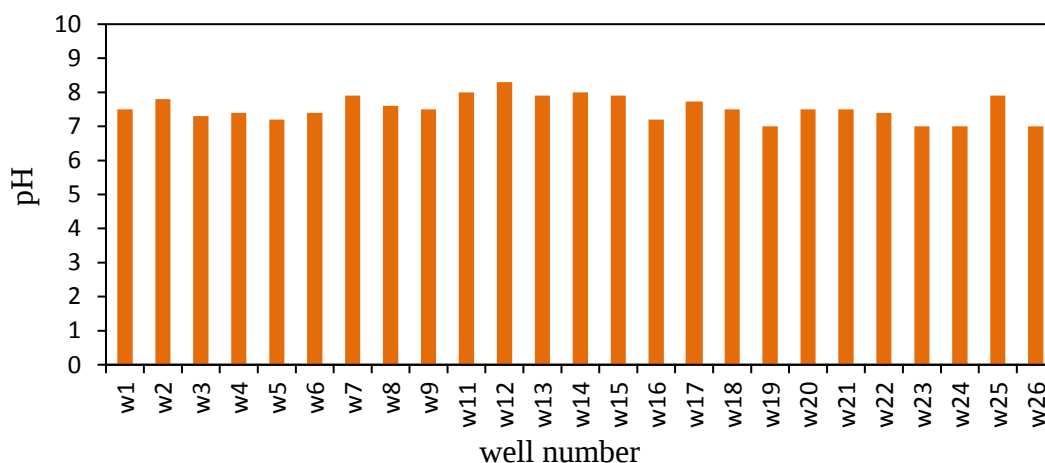


شکل ۵- محدوده نمونه‌های آب زیرزمینی بر اساس هدایت الکتریکی آبخوان سبزوار (a) و طبقه بندی نمونه‌ها بر اساس هدایت الکتریکی (b)
Fig. 5. The locations of the groundwater samples based on EC value (a) and the classification of the groundwater samples (b)

در حد خنثی بوده و تقریباً بین ۷ تا ۸ متغیر است. علت این امر می‌تواند احتمالاً هوازدگی کانی‌های کربناته موجود در منطقه تغذیه باشد که سبب قلیایی شدن pH در برخی از منابع آب زیرزمینی شده است (Freeze and cherry, 1979).

بررسی تغییرات pH

مقادیر pH در نمونه‌های برداشت شده از آبخوان سبزوار در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار pH در منطقه مورد مطالعه



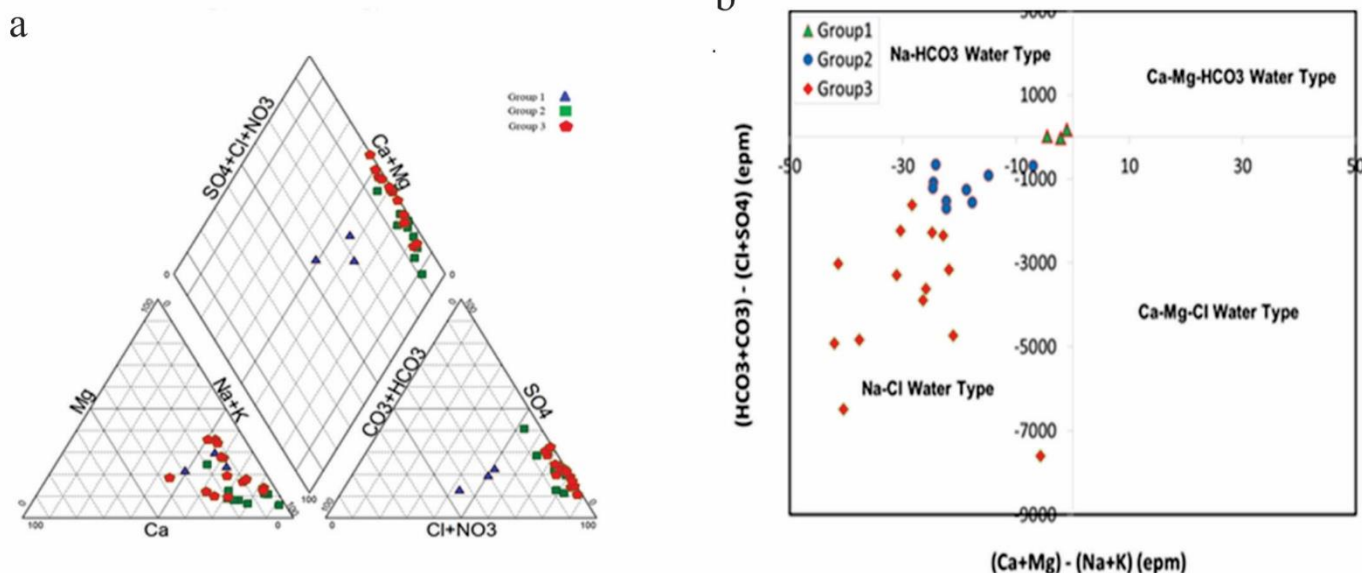
شکل ۶- مقادیر pH در نمونه‌های برداشت شده در آبخوان سبزوار
Fig. 6. The pH values of the water samples in the Sabzevar plain

به منظور بررسی تیپ آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه و ارزیابی کیفی آب زیرزمینی، از دیگرام پایپر و شولر استفاده شده است.

بررسی تیپ آب

دیاگرام پایپر

از نمودار پایپر می‌توان جهت تعیین نوع آب‌ها، رخساره‌های هیدروشیمیایی و مسیرهای تکامل هیدروژئوشیمیایی، نمایش تعداد زیادی نمونه در یک نمودار، نشان دادن تفاوت‌ها و شباهت‌ها بین نمونه‌های آب، تأثیر اختلاط بین آب‌های مختلف و بررسی تغییرات زمانی و مکانی نمونه‌ها بهره گرفت (Guler et al., 2002; Ahmed and Clark., 2016). شکل ۷، موقعیت نمونه‌های برداشت شده روی نمودار پایپر (a-۷) و نمودار تیپ آب (b-۷) را نشان می‌دهد. مطابق دیاگرام پایپر، منابع آب گروه G1 که هدایت الکتریکی کمتر از ۱۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر داشته و در قسمت شمالی دشت واقع شده‌اند، دارای تیپ غالب سدیم - بیکربنات می‌باشد. این تیپ آب معمولاً در مناطقی که تغذیه آب



شکل ۷- دیاگرام پایپر (a) و نمودار تیپ آب (b) در آبخوان سبزوار

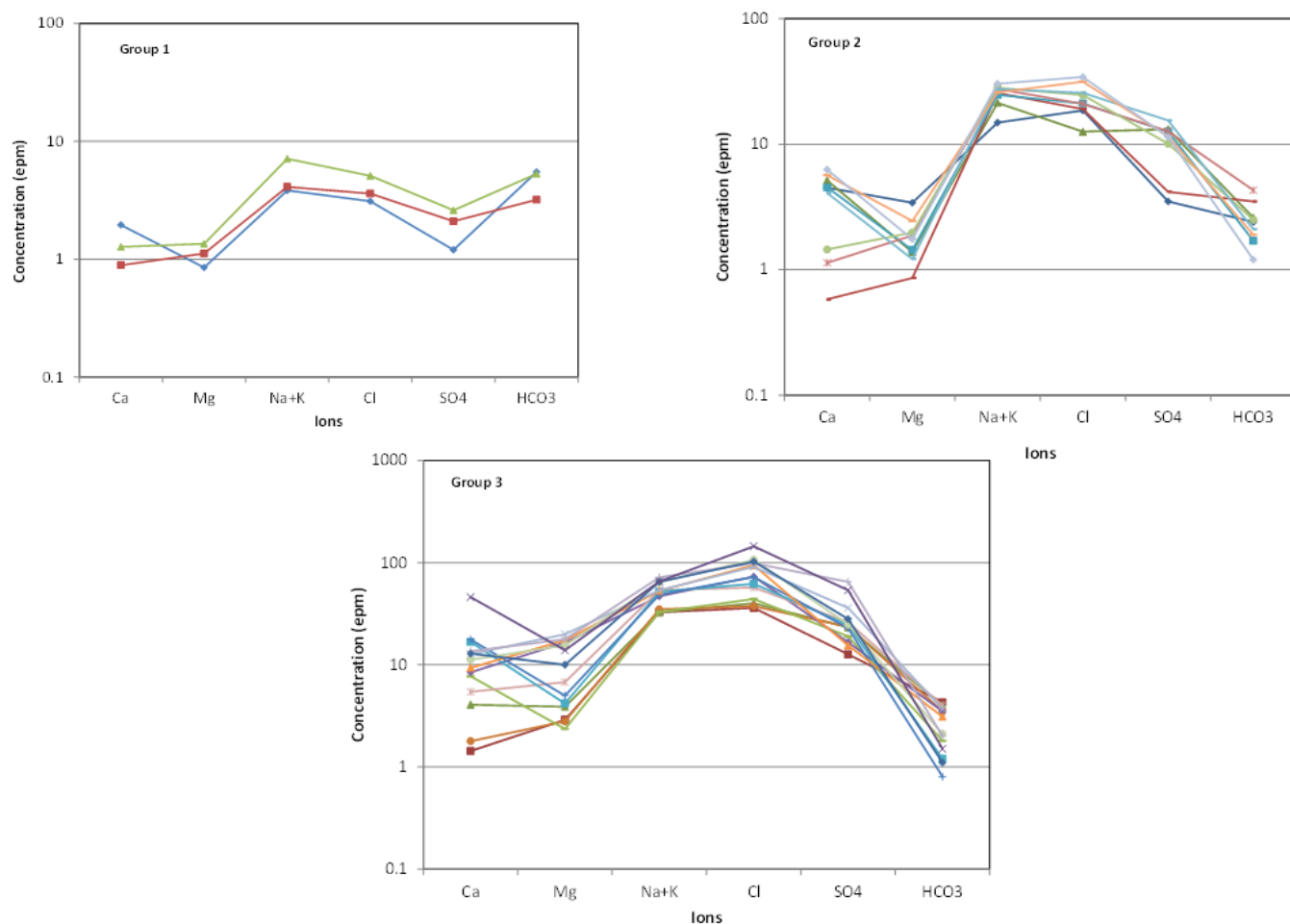
Fig. 7. The Piper diagram (a) and the water type diagram (b) of Sabzevar aquifer

دیاگرام شولر

شکل ۸ نمودار شولر سه گروه مشخص شده آب‌های زیرزمینی سبزوار را نشان می‌دهد. مطابق آن، گروه ۱ که در شمال

کلروره سدیک را نشان می‌دهند. بالا بودن سدیم و کلر می‌تواند ناشی از انحلال تبخیری‌ها، تبادل یونی و یا نفوذ آب شور از اطراف منطقه باشد (شکل ۸).

آبخوان قرار دارند و از آهک‌های شمال دشت تغذیه می‌شوند، روند مشابهی در تغییرات غلظت یون‌ها دارند که نشان‌دهنده یکسان بودن منشأ تغذیه در آن‌ها می‌باشد و دارای تیپ بیکربناته سدیک هستند. یون‌های غالب در گروه دوم و سوم نیز مشابه بوده و تیپ



شکل ۸- دیاگرام شولر در منابع آب دشت سبزوار

Fig. 8. The Schuler diagram of water samples in the Sabzevar plain

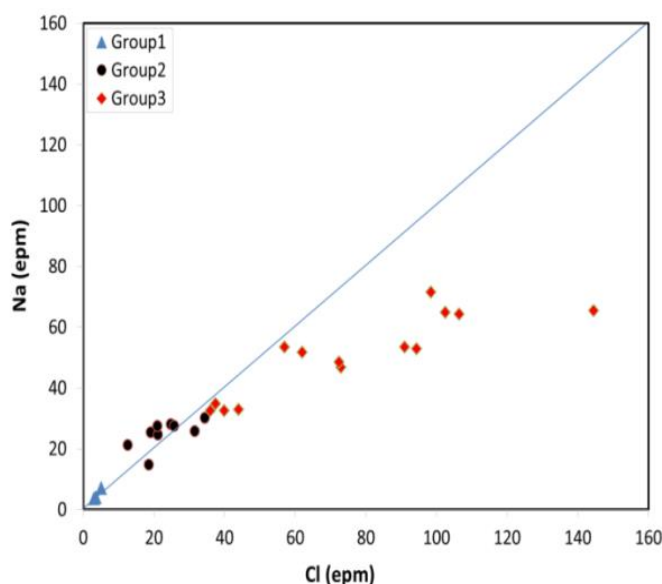
انحلال، یکی از عوامل مؤثر در تغییر کیفیت آب زیرزمینی می‌باشد که با رسم نمودار تغییرات یون سدیم در برابر یون کلر به بررسی این پدیده در دشت سبزوار پرداخته شده است (شکل ۹). با توجه به شکل، برخی نمونه‌ها بر روی خط انحلال قرار گرفته‌اند که نشانگر نقش انحلال تبخیری‌ها در افزایش شوری دشت بوده

تعیین منشأ شوری

همانطور که قبلاً بیان شد عوامل مختلفی از جمله زمین-شناسی منطقه، پدیده انحلال، تبادل یونی و نفوذ آب شور در تغییرات کیفی آب زیرزمینی دشت سبزوار سهمیم هستند. پدیده

است و انحراف بقیه نمونه‌ها از این خط نشانگر نقش عوامل ثانویه همچون تبادل یونی و یا تأثیر فعالیت‌های کشاورزی در تغییر

کیفیت آب زیرزمینی هستند که در ادامه به آن پرداخته شده است.

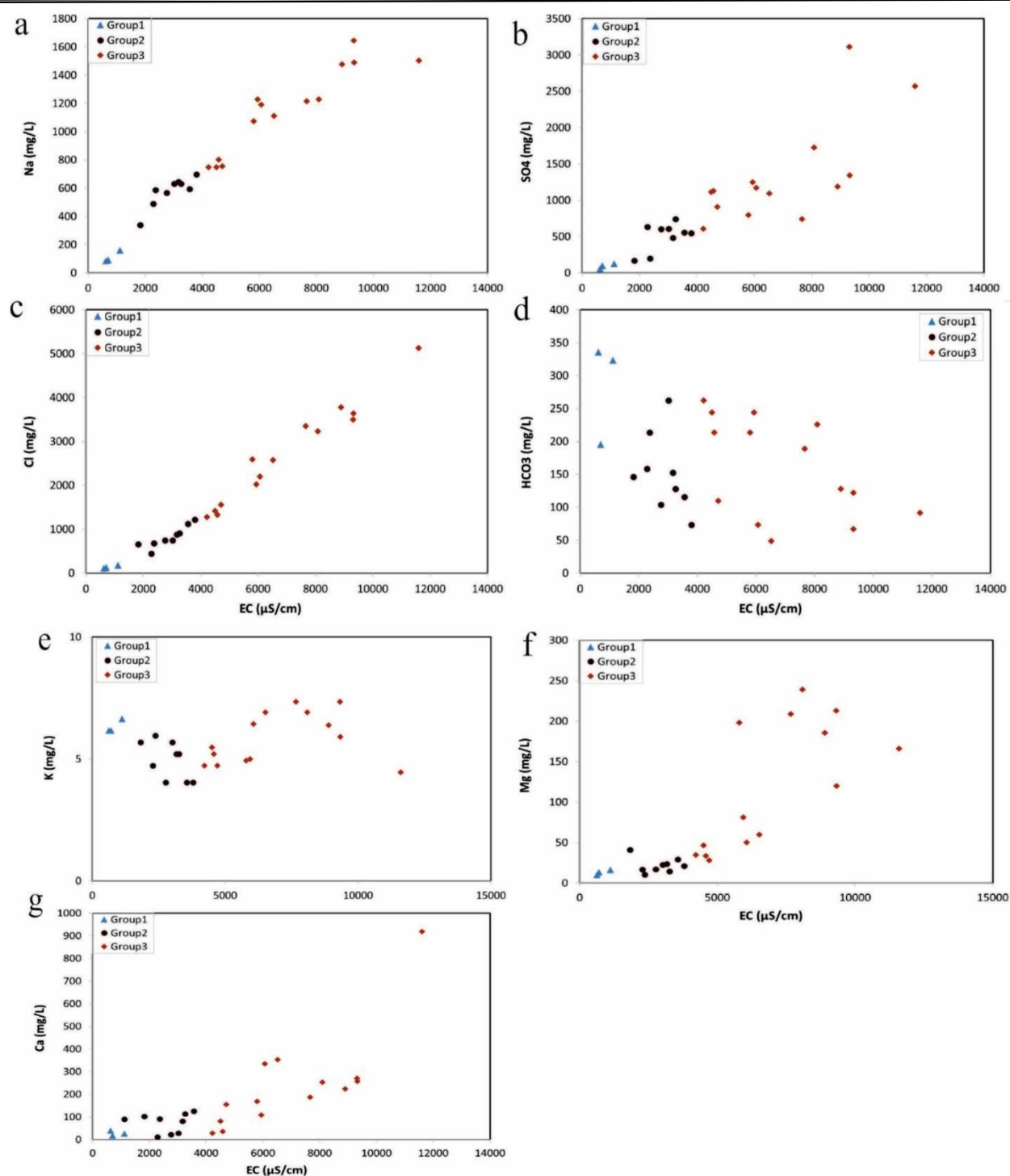


شکل ۹- رابطه سدیم و کلر در منابع آب آبخوان سبزوار

Fig. 9. The Na vs. Cl concentration of the water samples in the Sabzevar plain

به‌منظور شناخت بهتر عامل شوری و کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت سبزوار، رابطه هدایت الکتریکی (EC) با غلظت عناصر اصلی (سدیم، کلر، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سولفات و بیکربنات) بررسی شده است (شکل ۱۰). نمودارهای رسم شده نشان می‌دهند که، یون‌های سدیم و کلر (شکل ۱۰-a و C) و تا حدودی یون سولفات (b)، رابطه مستقیمی با هدایت الکتریکی دارند. با افزایش غلظت یون‌های سدیم و کلر، هدایت الکتریکی نیز افزایش می‌یابد که این امر بیانگر انحلال نمک و تأثیر این یون‌ها بر روی شوری دشت و کیفیت آب زیرزمینی می‌باشد. با افزایش هدایت الکتریکی، یون بیکربنات کاهش می‌یابد (شکل

۱۰-d) که این امر می‌تواند به دلیل اشباع شدن آب از کلسیت و دولومیت باشد که باعث رسوب و کاهش بیکربنات شده است. یون‌های کلسیم (شکل ۱۰-g)، منیزیم (شکل ۱۰-f) و سولفات نیز تا حدودی روند افزایشی با مقدار هدایت الکتریکی را نشان می‌دهند که نشانگر اثر انحلال کربنات‌ها و کانی‌های ژئپسی در منطقه می‌باشد. بطور کلی بیشترین میزان همبستگی با هدایت الکتریکی مربوط به یون‌های کلر و سدیم بوده که بیانگر تأثیر مستقیم این یون‌ها در تخریب کیفیت آب زیرزمینی و در نتیجه نشان‌دهنده انحلال تبخیری‌ها می‌باشند.



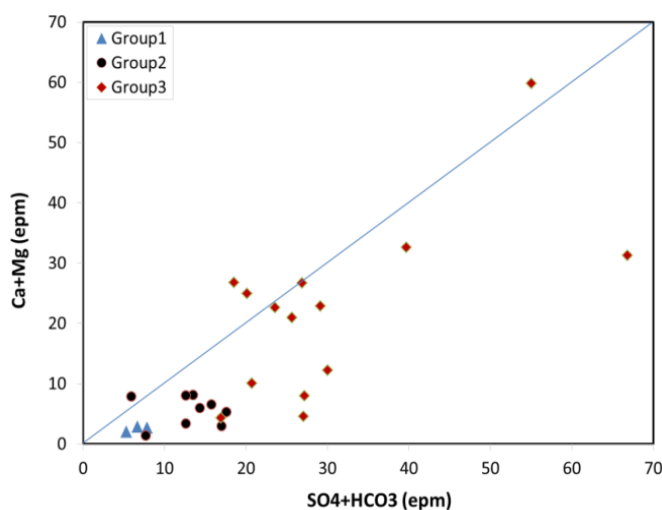
شکل ۱۰- ارتباط بین غلظت یون‌ها و هدایت الکتریکی در نمونه‌های آب زیرزمینی

Fig. 10. Relationship between ion concentrations and EC values of the water samples

تکامل ژئوشیمیایی دشت سبزوار

فرایندهای ژئوشیمیایی ثانویه مختلف همچون تبادل یونی و پدیده اختلاط می‌تواند غلظت یون‌های محلول در دشت را در طی زمان و در طول مسیر جریان تغییر دهد. فرآیند تبادل یونی در جایی رخ می‌دهد که کانی‌های رسی غنی از سدیم با کلسیم و منیزیم آب زیرزمینی وارد واکنش شده و باعث تغییر غلظت آن‌ها در آب زیرزمینی می‌شود (Kim et al., 2003). به‌منظور بررسی اثر فرآیند تبادل یونی بر تغییر غلظت عناصر، از نمودار تغییرات نسبت $Ca+Mg/SO_4+HCO_3$ استفاده شده است (شکل ۱۱). با توجه به نمودار، نمونه‌ها در نزدیکی خط انحلال و عمدتاً با کمی انحراف در زیر این خط پلات شده‌اند. این نشانگر این است که علاوه بر پدیده انحلال تبخیری‌ها و کربنات‌ها، پدیده ثانویه تبادل یونی نیز در منطقه رخ داده است. نمونه‌هایی که در زیر خط قرار گرفته‌اند، بیانگر تبادل یونی مستقیم می‌باشد که در طی این پدیده، یون سدیم موجود در رسوبات با یون کلسیم

و منیزیم محلول تبادل یافته و غلظت کلسیم و منیزیم در آب کمتر شده است. این پدیده می‌تواند در اثر ورود آب شیرین به آبخوان اتفاق بیفتد که به این پدیده Freshening گفته می‌شود. در آبخوان سبزوار، ورود آب شیرین از آهک‌های شمال دشت تأیید کننده این موضوع است. جهت بررسی پدیده Freshening و نفوذ آب شور (Intrusion) در محدوده مطالعاتی، نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار (HFE) (Hydrochemical Facies Evolution) ترسیم شده است (شکل ۱۲-ا). با توجه به شکل، قسمت‌های شمالی و جنوبی دشت تحت پدیده Freshening هستند ولی قسمت‌های میانی دشت در مسیر نفوذ آب شور قرار دارند (۱۲-ب). بنابراین نفوذ آب شیرین از بخش‌های شمالی و تا حدودی از بخش جنوبی به همراه نفوذ آب‌های شور از بخش‌های شرقی عامل اصلی کنترل کیفیت آب زیرزمینی دشت هستند که در طی آن تبادل یونی و اختلاط صورت می‌گیرد.



شکل ۱۱- نسبت $Ca+Mg$ در برابر SO_4+HCO_3 در منابع آب دشت سبزوار

Fig. 11. The $Ca+Mg$ vs. SO_4+HCO_3 in the water samples of the Sabzevar plain

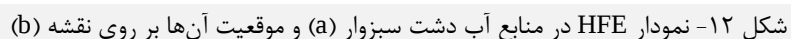
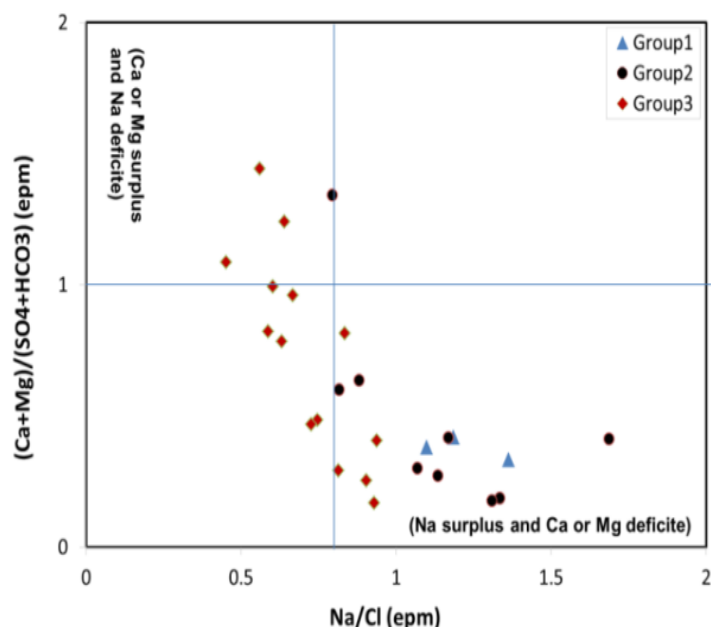


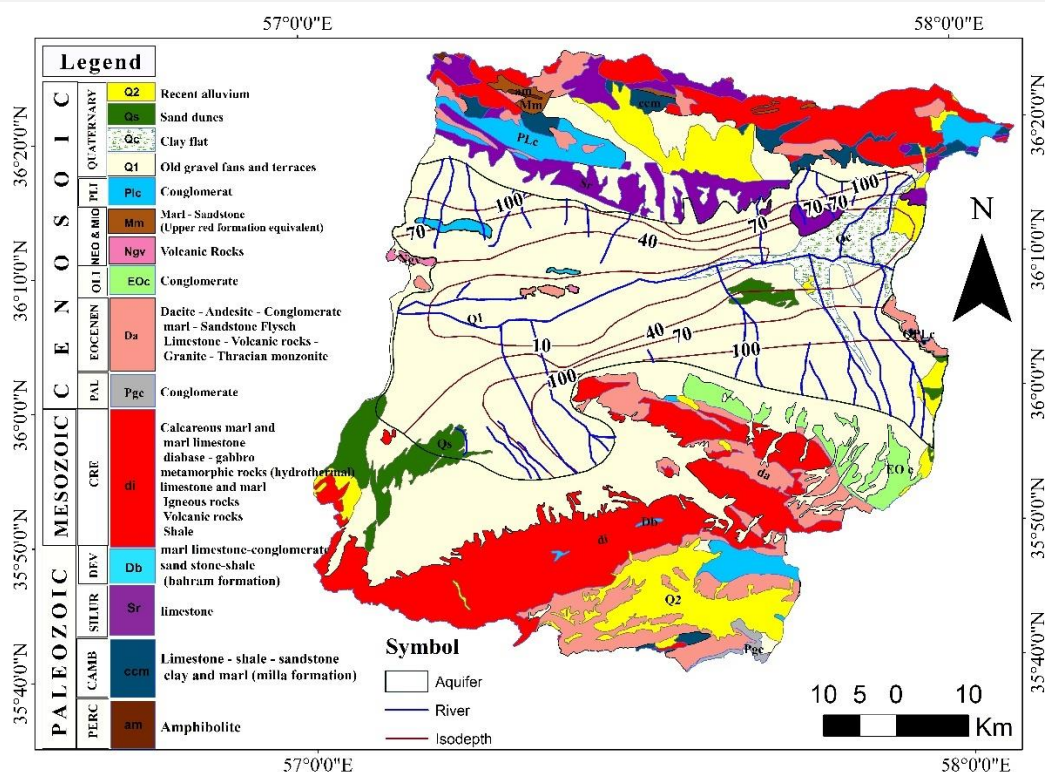
Fig. 12. HFE diagram of the water samples (a) and their locations on the map (b)

با بررسی تغییرات نسبت $\text{Ca}+\text{Mg}/\text{SO}_4+\text{HCO}_3$ در برابر نسبت Na/Cl ، می‌توان نتیجه گرفت که در گروه G_1 ، G_2 و تعدادی از نمونه‌های G_3 با افزایش نسبت Na/Cl ، نسبت $\text{Ca}+\text{Mg}/\text{SO}_4+\text{HCO}_3$ کاهش یافته است که می‌توان آن را به تبادل سدیم با کلسیم و منیزیم نسبت داد که تأییدکننده نتایج



شکل ۱۳- رابطه بین $\text{Ca}+\text{Mg}/\text{SO}_4+\text{HCO}_3$ در مقابل نسبت Na/Cl در نمونه‌های آب‌های زیرزمینی دشت سبزوار

Fig. 13. The relationship between $\text{Ca}+\text{Mg}/\text{SO}_4+\text{HCO}_3$ vs. Na/Cl in the water samples



شکل ۱۴- نقشه هم عمق آب‌های زیرزمینی دشت سبزوار

Fig. 14. Iso-depth map of the the Sabzevar plain

بررسی اختلاط آب شور در دشت سبزوار

برای بررسی اختلاط آب شور و سهم آب شور در نمونه‌های برداشتی دشت سبزوار، از یون کلر در رابطه زیر استفاده شده است (Wang and jiao, 2012):

$$F_{\text{Cl saltwater}} = [(Cl_{\text{sample}} - Cl_{\text{freshwater}}) / (Cl_{\text{saltwater}} - Cl_{\text{freshwater}})] \quad (2)$$

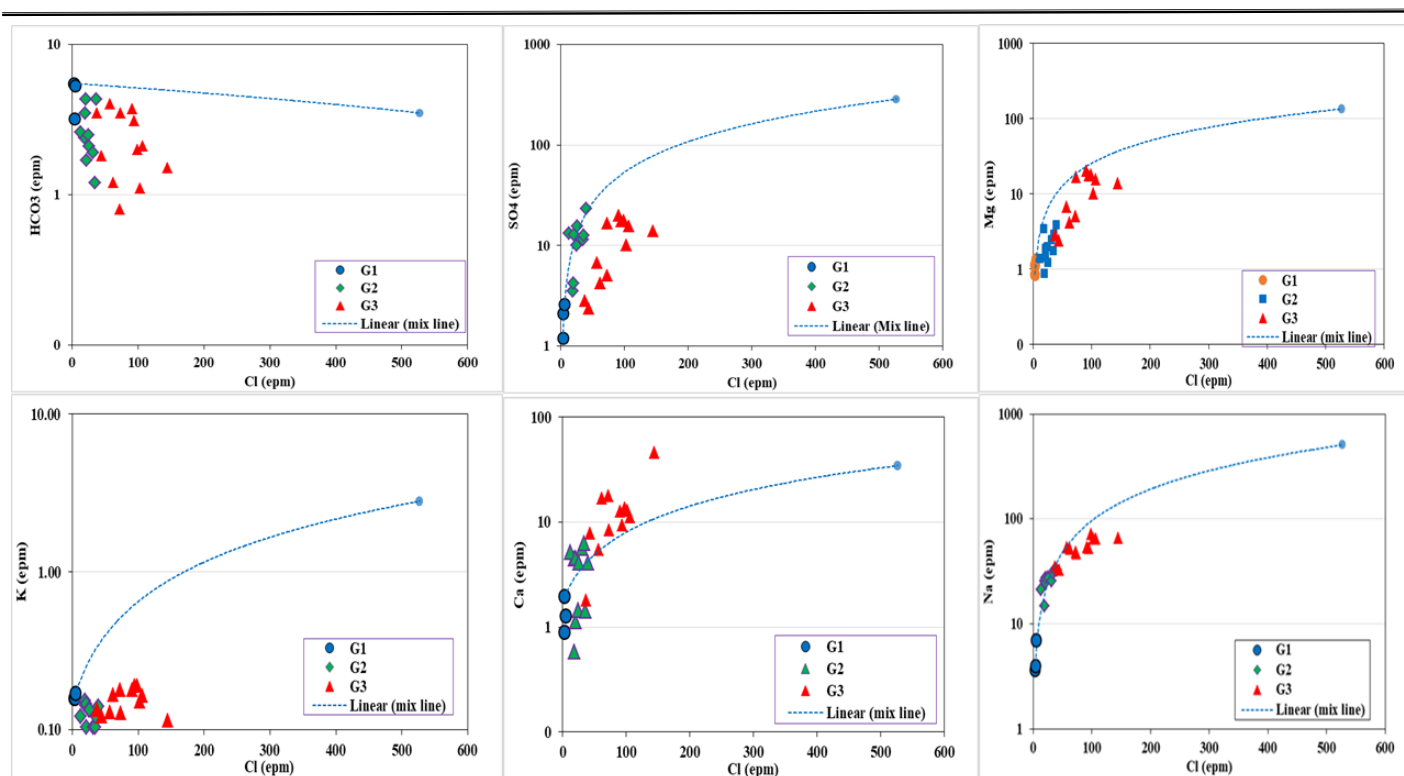
با استفاده از درصد آب شور در هر نمونه می‌توان غلظت هر یون را در نمونه برآورد کرد. به عبارت دیگر، اگر فقط پدیده اختلاط در منطقه رخ داده باشد، مقدار غلظت محاسباتی با اندازه گیری هر یون در هر نمونه باید یکسان باشد. برای اثبات این موضوع ابتدا غلظت هر یون در هر نمونه بر اساس درصد آب شور محاسبه شده است.

$$M_{i, \text{mix}} = f_{\text{saline}} * m_{i, \text{saline}} + (1 - f_{\text{saline}}) * m_{i, \text{fresh}} \quad (3)$$

در معادله (۳)، غلظت هر یون در آب شور و شیرین به عنوان دو سوی فرآیند اختلاط در نظر گرفته شده است. در این محاسبات، نمونه آب رودخانه کال شور به عنوان نماینده آب شور و نمونه شیرین‌ترین چاه منطقه واقع در بخش شمالی نیز به عنوان نماینده آب شیرین در نظر گرفته شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد اگر در منطقه اختلاط رخ داده باشد، باید مقدار محاسباتی ($m_{i, \text{mix}}$) با مقدار اندازه‌گیری شده ($m_{i, \text{sample}}$)، برابر باشد و یا تفاوت آن‌ها ناچیز باشد.

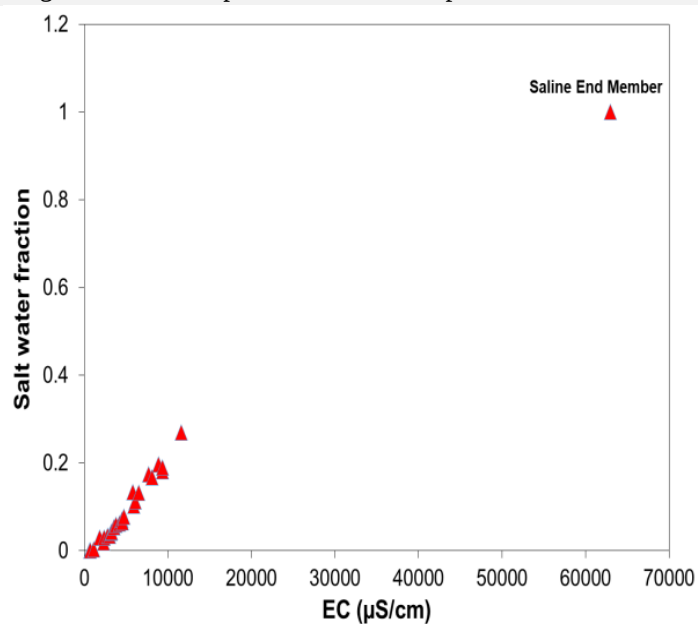
$$M_{i, \text{react}} = m_{i, \text{sample}} - m_{i, \text{mix}} \quad (4)$$

شکل ۱۵، غلظت یون‌های مختلف را در برابر کلر نشان می‌دهد. خط اختلاط به صورت خط‌چین مشخص شده است. اگر نفوذ آب شور عامل تغییر کیفیت آب زیرزمینی دشت سبزوار باشد، باید کلیه داده‌ها از خط اختلاط پیروی کنند. انحراف از خط علاوه بر اختلاط، نشان‌دهنده وجود فرآیندهای دیگری در کیفیت آب زیرزمینی می‌باشد. تمامی نمونه‌ها بجز بیکربنات و پتاسیم با انحراف کمی از خط تبعیت می‌کنند که نشان‌دهنده نفوذ آب شور و پدیده اختلاط به همراه رخداد فرایندهای ثانویه دیگر می‌باشد. با افزایش کلر میزان پتاسیم کاهش پیدا کرده و در زیر خط پلات شده است. کاهش پتاسیم می‌تواند به دلیل رقیق بودن پتاسیم در آب شور و یا جذب پتاسیم در خاک باشد. گیاهان و رس‌ها منابع اصلی کاهش پتاسیم هستند. یون بیکربنات هم به دلیل اشباع شدن و رسوب کربنات‌ها در طی مسیر جریان، کاهش یافته است. نمودار درصد اختلاط در شکل ۱۶ بیانگر درصد نفوذ آب شور است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حداکثر میزان نفوذ آب شور در آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، حدود ۳۰ درصد می‌باشد.



شکل ۱۵- بررسی فرآیند اختلاط در نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان سبزوار

Fig. 15. The mixing process in the groundwater samples of the Sabzevar plain



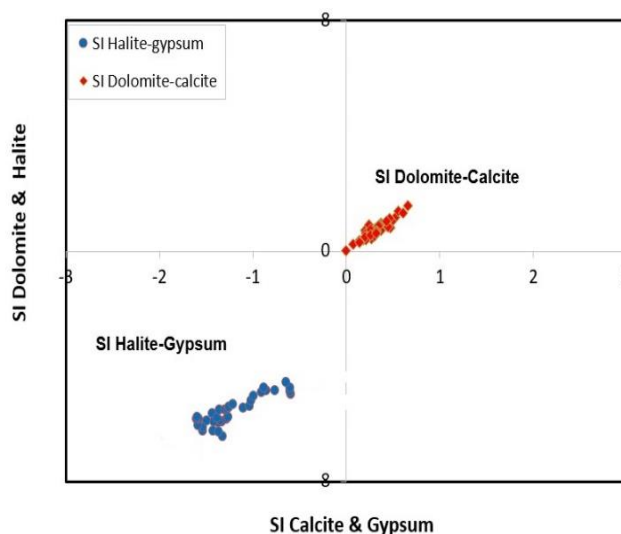
شکل ۱۶- درصد نفوذ آب شور در آب‌های زیرزمینی دشت سبزوار

Fig. 16. The salt water fraction of the water samples in the Sabzevar plain

شاخص اشباع

شاخص‌های اشباع آب زیرزمینی (Groundwater saturation index) به منظور توصیف تکامل شیمیایی آب زیرزمینی و ارزیابی قابلیت انحلال کانی‌ها و وضعیت اشباع آبخوان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص اشباع آب زیرزمینی برای منطقه مورد مطالعه محاسبه و در شکل ۱۷ آمده است.

تمامی نمونه‌ها نسبت به کلسیت و دولومیت اشباع و نسبت به ژیپس و هالیت تحت اشباع هستند. از دلایل تحت اشباع بودن ژیپس و هالیت می‌توان به انحلال پذیری بالا، اختلاط و رقیق شدن اشاره کرد. همچنین، حضور سازندهای کارستی در مناطق تغذیه و انحلال آن‌ها باعث آزاد شدن کلسیم و منیزیم و افزایش شاخص اشباع نسبت به کلسیم و منیزیم در طول جریان می‌شود.



شکل ۱۷- نمودار شاخص اشباع آب‌های زیرزمینی دشت سبزوار

Fig. 17. The saturation index of water samples in the Sabzevar plain

و در کلاس C_1S_1 قرار می‌گیرند. آب‌های خوب در کلاس‌های C_2S_1 و C_2S_2 ، C_1S_2 و بقیه آب‌ها در رده‌های آب‌های نامناسب ارزیابی می‌شوند. در کلاسه‌بندی آب زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی مربوط به منابع آب انتخابی در آبخوان محدوده سبزوار، دو نمونه (w7-w11) که هدایت الکتریکی پایینی دارند و در منطقه تغذیه در شمال دشت قرار دارند، در رده C_2S_1 قرار دارند که از لحاظ کیفی جزو آب‌های با کیفیت خوب دسته‌بندی می‌شوند. دو نمونه (w6-w12) در رده C_3S_2 قرار دارند که از لحاظ هدایت الکتریکی در گروه دوم ($1000 < EC < 4000$) می‌باشند، در گروه آب‌هایی با کیفیت متوسط دسته‌بندی می‌شوند و بقیه

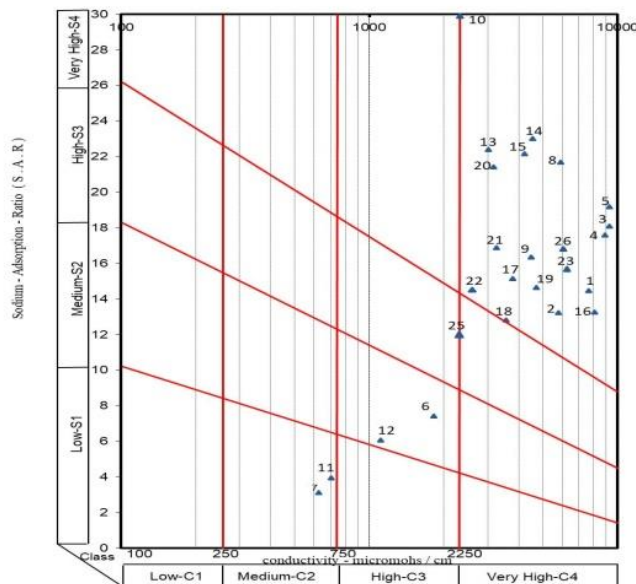
بررسی کیفیت آبخوان دشت سبزوار برای مصارف

کشاورزی

جهت بررسی استفاده آب آبخوان سبزوار جهت مصرف کشاورزی از نمودار ویلکاکس استفاده شده است (شکل ۱۸). طبقه‌بندی ویلکاکس کاربردی‌ترین روش برای طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی می‌باشد. نمودار ویلکاکس بر اساس دو پارامتر SAR و EC و به منظور تعیین کیفیت آب کشاورزی ارائه می‌شود (Wilcox and Durum., 1967). با توجه به این نمودار، آب‌های خیلی خوب دارای EC کمتر از ۲۵۰ میکروموس بر سانتیمتر بوده

هستند که باعث افزایش شوری خاک، کاهش حاصلخیزی و در نتیجه کاهش سطح زیر کشت و محصولات می شود.

نمونه ها با هدایت الکتریکی بالای ۴۰۰۰ میکروموس بر سانتی متر در رده C_4S_4 قرار دارند که جزء آب های نامناسب برای کشاورزی



شکل ۱۸- نمودار ویلکاکس آب های زیرزمینی دشت سبزوار

Fig. 18. The Wilcox diagram of water samples in the Sabzevar plain

غلظت یون های سدیم و کلر، هدایت الکتریکی نیز افزایش می یابد که این امر بیانگر انحلال نمک و تأثیر این یون ها بر روی شوری دشت و کیفیت آب زیرزمینی می باشد. با توجه به عمق زیاد تراز آب در چاه ها، تبخیر نمی تواند عاملی برای تغییر کیفیت و شوری آب زیرزمینی باشد. قسمت های شمالی و جنوبی دشت تحت پدیده *freshening* هستند ولی قسمت های میانی دشت در مسیر نفوذ آب شور قرار دارند. بنابراین تغذیه آب شیرین از بخش های شمالی و تا حدودی از بخش جنوبی به همراه نفوذ آب های شور از بخش های شرقی عامل اصلی کنترل کیفیت آب زیرزمینی دشت هستند که در طی آن تبادل یونی و اختلاط نیز صورت می گیرد. حداکثر میزان نفوذ آب شور و درصد اختلاط در آب های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، ۳۰ درصد می باشد. بطور

نتیجه گیری

دشت سبزوار یکی از دشت های مهم استان خراسان رضوی بوده که در حوزه آبریز کویر مرکزی قرار دارد. این دشت از سمت شمال و تا حدودی در بخش شمال شرقی-غربی توسط ارتفاعات آهکی و افیولیتی احاطه شده است و نقش عمده و اصلی در تغذیه آبخوان را دارند. در سمت شرق نیز به آبخوان تقریباً شور عطائیه متصل می باشد و تغذیه زیرزمینی نیز از بخش شرقی صورت می گیرد. به طور کلی جهت جریان آب زیرزمینی از سمت شرق به سمت غرب و کفه های نمکی می باشد. تیپ غالب آب در دشت بیشتر به صورت بیکربناته سدیک در مناطق تغذیه شمالی و بخشی از قسمت های جنوبی و تیپ کلروره سدیک در بخش شرقی و میانی دشت و در حوالی کال شور، می باشد. با افزایش

تمرکز بالای چاه‌های برداشتی در شمال و جنوب آبخوان می‌تواند دلیل نفوذ آب شور و افزایش هدایت الکتریکی در شرق آبخوان باشد.

References

- Ahmed, A. Clark, I., 2016. Groundwater flow and geochemical evolution in the Central Flinders Ranges, South Australia. *Science of the Total Environment* 572, 837-851.
- Alfarrah, N., Walraevens, K., 2018. Groundwater overexploitation and seawater intrusion in coastal areas of arid and semi-arid regions. *Water* 10 (2), 143.
- Amanambu, A.C., Obarein, O.A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S.S., Balogun, O., Oyebamiji, A. and Ochege, F.U., 2020. Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology* 589, 125163.
- Bagheri, R., Bagheri, F., Eggenkamp, H.G.M., 2017. Origin of groundwater salinity in the Fasa Plain, southern Iran, hydrogeochemical and isotopic approaches, *Environmental Earth Sciences* 76, 662.
- Bagheri, R., Nosrati, A., Jafaria, H., Eggenkamp, H.G.M., Mozafaric, M., 2019. Overexploitation hazards and salinization risks in crucial declining aquifers, chemo-isotopic approaches. *Journal of Hazardous Materials* 369 (2019) 150-163.
- Brunner, P., Therrien, R., Renard, P., Simmons, C.T., Franssen, H.J.H., 2017. Advances in understanding river-groundwater interactions. *Reviews of Geophysics* 55 (3), 818-854.
- Cherry, J.A., Freeze, R.A., 1979. *Groundwater*, 370. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Dashti Barmaki, M., Saberinasr, A., Yazdani Noori, Z., 2024. Optimization of groundwater quality monitoring network in the Rafsanjan aquifer using geostatistical kriging algorithm and vulnerability mapping. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 9 (2), 277-306.
- Doveri, M., Menichini, M. and Scozzari, A., 2015. Protection of groundwater resources: worldwide regulations and scientific approaches. *Threats to the Quality of Groundwater Resources: Prevention and Control* 13-30.
- Fetter, C.W., Boving, T., Kreamer, D., 2018. *Contaminant Hydrogeology* (Ed). Waveland Press.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science* 170 (3962), 1088-1090.
- کلی، افزایش شوری آب زیرزمینی در آبخوان سبزوار می‌تواند به علت موقعیت زمین‌شناسی و برداشت بیش از حد از منابع زیرزمینی، نفوذ آب شور و ترکیب با آب شیرین، پدیده انحلال نمک، تبادل یونی، جریان‌ات سطحی و وجود کفه‌های نمکی باشد.
- Güler, C., Thyne, G.D., McCray, J.E. and Turner, K.A., 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology journal* 10, 455-474.
- He, S., Li, P., Wu, J., Elumalai, V., Adimalla, N., 2020. Groundwater quality under land use/land cover changes: a temporal study from 2005 to 2015 in Xi'an, northwest China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 26 (10), 2771-2797.
- Kim, Y., Lee, K.S., Koh, D.C., Lee, D.H., Lee, S.G., Park, W.B., Koh, G.W., Woo, N.C., 2003. Hydrogeochemical and isotopic evidence of groundwater salinization in a coastal aquifer: a case study in Jeju volcanic island, Korea. *Journal of Hydrology* 270 (3-4), 282-294.
- Kumar, A., Singh, A., 2024. Pollution source characterization and evaluation of groundwater quality utilizing an integrated approach of Water Quality Index, GIS and multivariate statistical analysis. *Water Supply* 24 (10), 3517-3539.
- Liu, H., Hu, X., Zhu, H., Xing, L., Han, Z., Hu, K., Wang, X., Huang, L., 2025. Analysis of the hydrogeochemical characteristics of groundwater and identification of pollution sources in facility agriculture areas using self-organizing neural networks. *Environmental Earth Sciences* 84 (6), 161.
- Margarita, M., Busico, G., Mastrocicco, M., Kazakis, N., 2022. Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges *Science* 846, 157355.
- Millogo, C., Sako, A., Sagnon, B., Nakolendousse, S., 2024. Hydrochemical and spatial assessment of groundwater quality from fractured basement aquifers in the south-central of Burkina Faso, West Africa.
- Mjemah, I.C., Van Camp, M., Walraevens, K., 2009. Groundwater exploitation and hydraulic parameter estimation for a Quaternary aquifer in Dar es Salaam, Tanzania. *Journal of African Earth Sciences* 55 (3-4), 134-146.
- Moghadam, H.S., Khedr, M.Z., Arai, S., Stern, R.J., Ghorbani, G., Tamura, A., Ottley, C.J., 2015. Arc-related harzburgite-dunite-chromitite complexes in the mantle section of the Sabzevar ophiolite, Iran: a model for the formation of podiform chromitites. *Gondwana Research* 27 (2), 575-593.

- Muratoglu, A., Iraz, E., Ercin, E., 2022. Water resources management of large hydrological basins in semi-arid regions: Spatial and temporal variability of water footprint of the Upper Euphrates River basin. *Science of the Total Environment* 846, 157396.
- Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 25 (6), 914-928.
- Shakeri1, A., Sharafi, N., Rastegari Mehr, M., Abdollahbeglou, L., 2025. Assessment of water quality and hydrogeochemical processes in proximity to a municipal landfill site: case study of the Mohammadabad Landfill, Qazvin, Iran. *Kharazmi Journal of Earth* 11 (1), 103-130.
- Shojaat, B., Hassanipak, A.A., Mobasher, K., Ghazi, A.M., 2003. Petrology, geochemistry and tectonics of the Sabzevar ophiolite, North Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21 (9), 1053-1067.
- Sudegi, P., Bagheri, R., 2024. Determining safe groundwater yield in arid regions of Iran (case study: Davarzan aquifer). *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 10(2), 329-343.
- Vespasiano, G., Cianflone, G., Romanazzi, A., Apollaro, C., Dominici, R., Polemio, M., De Rosa, R., 2019. A multidisciplinary approach for sustainable management of a complex coastal plain: The case of Sibari Plain (Southern Italy). *Marine and Petroleum Geology* 109, 740-759.
- Wang, Y., Jiao, J.J., 2012. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in the confined Quaternary aquifer of the Pearl River Delta, China. *Journal of Hydrology* 438, 112-124.
- Wilcox, L.V. Durum, W.H., 1967. Quality of irrigation water. *Irrigation of agricultural lands* 11, 104-122.
- Xiao, Y., Shao, J., Frape, S., Cui, Y., Dang, X., Wang, S., Ji, Y., 2018. Groundwater origin, flow regime and geochemical evolution in arid endorheic watersheds: a case study from the Qaidam Basin, northwestern China. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 4381-4400.
- Xing, L., Guo, H., Zhan, Y., 2013. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain. *Journal of Asian Earth Sciences* 70, 250-264.
- Xu, L.G., Zhang, Q., Zuo, H.J., 2009. Status and progress of research on interaction and coupled modeling of surface water and groundwater. *Water Resources Protection* 25 (5), 82-85.
- Zhao, X., Guo, H., Wang, Y., Wang, G., Wang, H., Zang, X., Zhu, J., 2021. Groundwater hydrogeochemical characteristics and quality suitability assessment for irrigation and drinking purposes in an agricultural region of the North China plain. *Environmental Earth Sciences* 80 (4), 162.
- Ziwen, Z., Zhifang, Z., Vanapalli, S.K., 2024. A quantitative study of changing groundwater-surface water interactions of a large reservoir due to impoundment based on hydrochemistry and isotope characteristics. *Journal of Hydrology* 634, 131092.